

**П.В. КАПЛУН**, к.т.н., доцент каф. ЗНМ Хмельницкого национального университета

## СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ И КОНТАКТНОЙ ВЫНОСЛИВОСТИ ЗУБЧАТЫХ КОЛЁС

Изложены результаты экспериментальных исследований износостойкости и контактной выносливости образцов из различных сталей после упрочнения методами термической обработки и ионного азотирования в водородных и безводородных средах, при трении качения с проскальзыванием. Отмечена важность влияния градиента свойств полученных композиций на эксплуатационные характеристики. Предложены способы повышения контактной выносливости и износостойкости зубчатых колёс.

**Ключевые слова:** износостойкость, контактная выносливость, трение качения, проскальзывание.

**Введение. Актуальность задачи.** Зубчатые передачи имеют широкое применение в технике. Их долговечность и надежность часто определяют надежность и долговечность машин в целом. Опыт эксплуатации зубчатых колёс свидетельствует, что подавляющее большинство выходов их из строя происходит в результате разрушения поверхности контакта в закрытых передачах и поломки зубьев от сгиба в открытых передачах. В настоящее время существует много способов повышения износостойкости и долговечности зубчатых передач, но проблема не решена до конца и является актуальной.

**Анализ литературы.** Поверхностные слои в процессе эксплуатации зубчатых колёс разрушаются в результате циклического действия контактных напряжений, величина которых достигает 3570МПа [1], и изнашиваются в результате проскальзывания контактирующих поверхностей шестерни и колеса. Максимальные напряжения изгиба возникают в момент, когда вся нагрузка воспринимается одной парой зубцов, а точка его приложения находится в положении, наиболее удаленная от корня зуба. При этом максимальные напряжения изгиба концентрируются в основе зуба, и в зоне выкружки возникает концентрация напряжений. Для прямозубых зубчатых колёс коробок передач максимальные напряжения изгиба достигают 850МПа [2], а для цементируемых тяжело нагруженных зубчатых колёс – до 2500МПа [1].

В зубчатых парах, совместное качение происходит лишь в полюсе. Поскольку направление перемещений контактных линий шестерни и колеса противоположные, то между ними происходит проскальзывание. Скорость скольжения равна разности скоростей качения шестерни и колеса, и увеличивается с увеличением передаточного числа. Проскальзывания поверхностей контактирующих зубьев вызывает трение в зоне контакта и износ материала.

На напряженно-деформированное состояние материала зубцов большое влияние оказывает скорость приложения нагрузок. Как показали исследования [3, 4] контакт между двумя зубцами происходил в течение  $10^{-3}$ - $10^{-4}$ с. Расчеты показывают, что даже в тихоходных зубчатых передачах приложение нагрузки в контакте происходит ударом [3]. При совместном действии нормальных и касательных напряжений в тонком поверхностном слое материала создается объемное напряженное состояние, которое способствует возникновению пластических деформаций. Высокие контактные напряжения и пластическая де-

формация вызывают в точках фактического контакта мгновенные температуры, достигающие 700-800°C, которые быстро снижаются на протяжении цикла [3]. Таким образом, поверхность контактирующих зубьев воспринимает циклическое температурное воздействие. В результате силового и температурного воздействий в микрообъемах происходит быстрая диффузия элементов к поверхности контакта.

Таким образом, анализ условий эксплуатации зубчатых колёс показывает, что долговечность работы зубчатых передач в значительной степени зависит от детального изучения условий работы зацепления, характера напряженно-деформированного состояния различных зон зубчатых колёс, правильного подбора материалов и методов укрепления этих зон, в соответствии с величиной и характером напряженного состояния. Решить эту проблему с помощью только одной технологии трудно. Необходимо применение комбинации нескольких технологий упрочнения рабочей поверхности и сердцевины зубчатого колеса, которые бы обеспечили оптимальные свойства, как на поверхности, так и по глубине в каждой из зон в соответствии с величиной и характером нагрузки. Такими технологиями могут быть: термическая и химико-термическая обработки материала; нанесение на поверхность покрытий с заранее заданными свойствами, в соответствии с напряженным состоянием в поверхностных слоях зубчатых колёс.

В настоящее время для упрочнения зубчатых передач широко применяются цементация и нитроцементация малоуглеродистых сталей с последующей термической обработкой материала, обеспечивающие значительное увеличение их износостойкости и долговечности. Однако, эти технологии проводятся в средах содержащих большое количество водорода, который вредно влияет на прочность сталей.

Согласно современным представлениям [6-9], водород длительное время может находиться в стали в виде ионов и молекул. Небольшое количество водорода в стали не вызывает заметных изменений её свойств. Повышение концентрации водорода в стали выше некоторого предела, зависящего от качества стали, изменяет её физические и механические свойства и может вызвать появление дефектов, влияющих на прочность. Водород в стали меняет её механические свойства при кратко-временном и длительном статическом нагружении, а также при повторно-переменном и ударном нагружении [6-9].

Перспективной технологией упрочнения поверхности материалов является ионное азотирование в безводородных насыщающих средах (смесях азота с аргонном) [10], применение которой исключает вредное влияние водорода на металл.

**Постановка задачи.** Исследование влияния ионного азотирования на характеристики прочности и остаточные напряжения в сталях, а также определение влияния твердости покрытий и основы на контактную выносливость образцов при качении с проскальзыванием.

**Результаты исследований.** С целью выявления влияния водорода на металл при ионном азотировании проведены экспериментальные исследования физико-механических и эксплуатационных характеристик азотированных образцов различных сталей в водородсодержащих и безводородных насыщающих средах при растяжении, изгибе и циклическом контактом нагружении.

Исследование прочности и пластичности при растяжении проводились на плоских образцах из сталей Ст.3, 40Х, 65Г и 12Х18Н10Т, изготовленных по

ГОСТ 9651-73, которые подвергались ионному азотированию по различным технологическим режимам. Образцы имели длину 75мм и рабочее сечение 3×3мм. Исследования проводились на установке ИМАШ 20-78. В процессе экспериментов исследовались следующие характеристики: предел прочности  $\sigma_b$ , предел текучести  $\sigma_t$ , предел пропорциональности  $\sigma_{пл}$ , относительное удлинение  $\delta$ , относительное сужение  $\psi$ , удельная работа разрушения  $A$ , а также проводились фактографические исследования процесса разрушения. В процессе исследований замерялись размеры сечения образцов до и после испытаний, осуществлялась запись диаграммы растяжения и видеозапись процесса разрушения. Все опыты проводились при комнатной температуре при скорости передвижения подвижного захвата 0,1мм/мин. и повторялись 3 раза.

В таблице 1 приведены результаты исследований характеристик прочности и пластичности сталей Ст.3, 40Х, 65Г и 12Х18Н10Т при испытании на растяжение. Образцы из данных сталей подвергались ионному азотированию в водородсодержащей среде (75об.% N<sub>2</sub> + 25об.% H<sub>2</sub>) и безводородной среде (75об.% N<sub>2</sub> + 25об.% Ar) по следующему режиму: температура азотирования T=580°C; давление среды p=240Па, продолжительность азотирования  $\tau$ =4 часа.

Исследования показали, что процесс ионного азотирования оказывает существенное влияние на прочностные и пластические свойства сталей, повышая прочностные характеристики и снижая пластические свойства. При ионном азотировании в безводородной среде предел прочности образцов из исследуемых сталей повысился на 4-11%, при этом их пластические характеристики снизились в 1,1-3 раза. Наблюдается большее влияние ионного азотирования на менее легированные стали. Так, если для стали 12Х18Н10Т увеличение предела прочности образцов составляло 4%, а снижение относительного удлинения и относительного сужения – около 10%, то для стали Ст.3 предел прочности образцов увеличился на 11%, пластические характеристики  $\delta$  и  $\psi$  уменьшились более чем в 3 раза.

Таблица 1 – Физико-механические характеристики образцов из различных сталей при испытаниях на растяжение до и после ионного азотирования (режим азотирования: T=580°C, p=240Па,  $\tau$ =4 часа)

№ п/п	Марка стали	Среда ионного азотирования	Предел прочности $\sigma_b$ , МПа	Предел текучести $\sigma_t$ , МПа	Относительное удлинение $\delta$ , %	Относительное сужение $\psi$ , %	Удельная работа деформации $A$ , МПа
1	Ст.3	не азотиров.	500	247	30,0	60,0	105,0
		75 об.% N <sub>2</sub> + 25 об.% Ar	557	295	10,0	25,0	51,0
		75 об.% N <sub>2</sub> + 25 об.% H <sub>2</sub>	474	338	6,0	18,0	25,0
2	40Х	не азотиров.	560	380	10,0	30,0	41,1
		75 об.% N <sub>2</sub> + 25 об.% Ar	623	551	5,65	21,4	28,9
		75 об.% N <sub>2</sub> + 25 об.% H <sub>2</sub>	605	566	3,12	6,87	15,2
3	65Г	не азотиров.	700	320	9,0	25,0	59,8
		75 об.% N <sub>2</sub> + 25 об.% Ar	744	587	3,83	14,9	29,4
		75 об.% N <sub>2</sub> + 25 об.% H <sub>2</sub>	661	544	2,67	10,8	16,5
4	12Х18Н10Т	не азотиров.	520	280	40,5	55,2	182,3
		75 об.% N <sub>2</sub> + 25 об.% Ar	551	321	37,5	49,4	170,2
		75 об.% N <sub>2</sub> + 25 об.% H <sub>2</sub>	546	318	36,1	45,2	156,7

Сопоставление характеристик прочности и пластичности после ионного азотирования в водородсодержащих и безводородных средах (таблица 1) показывает, что присутствие водорода в насыщающей среде приводит к значительному снижению этих характеристик малолегированных конструкционных сталей. Так, временное сопротивление образцов из сталей Ст.3 и 65Г после ионного азотирования в водородсодержащей среде снизилось на 17,7% и 12,5% соответственно, по сравнению с его значением после ионного азотирования в безводородной среде. Результаты оказались даже ниже, чем у не азотированных сталей. Еще большее влияние при ионном азотировании оказывает водородсодержащая среда на снижение пластичности сталей. Так, для сталей Ст.3, 40Х и 65Г, азотированных в водородсодержащей среде, относительное удлинение  $\delta$  уменьшилось соответственно на 40, 45 и 31%, а относительное сужение  $\psi$  на 28, 68 и 27,5% по сравнению с их значениями при азотировании в безводородной среде (таблица 1). Это обусловлено вредным влиянием водорода на сталь, связанным с водородным охрупчиванием и водородной коррозией металла, что подтверждает теоретические концепции, выдвинутые в работах [6-9].

Вредное влияние водорода на пластические свойства сталей наглядно видно по удельной работе деформации, представляющей собой площадь диаграммы растяжения в системе координат  $\sigma$ ,  $\delta$ . Расчеты показали, что удельная работа деформации сталей Ст.3, 40Х, 65Г и 12Х18Н10Т, азотированных в водородсодержащей среде меньше соответственно в 2,1; 1,9; 1,8 и 1,05 раза по сравнению с ее значениями при азотировании в безводородной среде (таблица 1). Из приведенных данных видно, что с увеличением степени легирования стали уменьшается вредное влияние водорода на ее механические свойства.

Исследования на многоцикловую усталость при изгибе проводились на гладких цилиндрических образцах диаметром 5 мм на машине ИМА-5 при чистом изгибе с вращением (частота 50 Гц), в среде 3%-ного раствора NaCl и в воздухе. Образцы изготавливались из Стали 45, часть из которых подвергалась ионному азотированию в водородсодержащей (60 об. % N<sub>2</sub> + 40 об. % H<sub>2</sub>) и безводородной (60об.% N<sub>2</sub> + 40об.% Ar) средах при постоянстве остальных технологических параметров (T=540°C, p=80Па,  $\tau$ =240мин).

Результаты этих исследований (рисунок 1,а) показывают, что предел выносливости образцов, подвергавшихся ионному азотированию в безводородной среде при испытаниях в воздухе повысился в 1,75 раза (с 210 до 370МПа), а при испытаниях в 3%-ном растворе NaCl в 3,6 раза (с 30 до 110МПа), по сравнению с его значениями для не азотированных образцов. Предел выносливости образцов, азотированных в водородсодержащей среде (кривая 3), при испытаниях в 3%-ном растворе NaCl на 25 % ниже по сравнению с образцами, азотированными по аналогичному режиму в безводородной среде. Причиной такого снижения предела выносливости стали является вредное влияние водорода, вызывающее: декогерцию кристаллической решетки металла; взаимодействие атомов водорода в металле с дислокациями; давлением молекулярного водорода в микрополостях стали; химическое взаимодействие водорода с компонентами сплава и выделением водородсодержащих фаз [6].

Значительное повышение многоциклового усталости образцов после ионного азотирования обусловлено образованием нитридных фаз на поверхности металла и возникновением в азотированных слоях остаточных напряжений сжатия. Величина напряжений сжатия при ионном азотировании достигает 800МПа и может изменяться в широких пределах с помощью изменения технологических парамет-

ров процесса диффузионного насыщения (рисунок 1,б). Максимальный эффект от остаточных напряжений сжатия достигается при их оптимальном значении.

Исследование контактной выносливости сталей при трении качения с проскальзыванием проводилось на специальной установке трения качения [12], что монтировалась на базе сверлильного станка с вертикальным шпинделем. По круговой дорожке плоских образцов перекачивались шарики или цилиндрические ролики с коэффициентом проскальзывания 0,4 и 17,7 % соответственно. Нагрузки на тела качения 50, 100, 160, 250 Н (максимальное давление  $p_0$  2075; 2615; 3057; 3180 МПа соответственно), частота вращения шпинделя 900 мин<sup>-1</sup>. Исследовались образцы из различных сталей после ионного азотирования в водородной и безводородных средах с различной термической обработкой и покрытиями хрома и нитрида титана.

Результаты сравнительных исследований износостойкости и контактной выносливости образцов приведены в таблицах 2 и 3 и на рисунке 2.

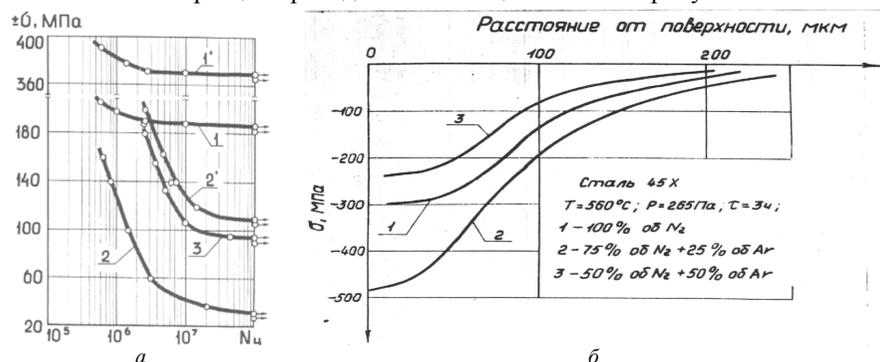


Рисунок 1 – Результаты сравнительных исследований износостойкости и контактной выносливости образцов:

а – кривые усталости в воздухе (1 и 1') и в 3%-ном растворе NaCl (2, 2', 3) стали 45X при испытаниях на чистый изгиб цилиндрических образцов без химико-термической обработки (1 и 2), азотированных в тлеющем разряде в безводородной (60об.% $N_2$ +40об.%Ar) среде (1' и 2') и водородсодержащей (60об.% $N_2$ +40об.% $H_2$ ) среде (3) при постоянстве остальных технологических параметров; б – распределение остаточных напряжений в азотированном слое стали 45X после ионного азотирования в различных средах при постоянстве остальных факторов ( $T=560^\circ\text{C}$ ;  $p=265\text{Па}$ ;  $\tau=3\text{ч}$ )

Контактная выносливость образцов после ионного азотирования в безводородной среде в 1,4-1,5 раз больше по сравнению с не азотированными образцами и на 14-25% выше по сравнению с азотированием в водородной среде. Снижение контактной выносливости образцов, которые азотировались в водородной среде, объясняется вредным воздействием водорода на металл. Образцы из стали 45 после закалки с последующим азотированием имели на порядок выше контактную выносливость и износостойкость по сравнению с не упрочненными образцами. Это объясняется высокой твердостью основы, на которую опирался азотированный слой. При малой жесткости основы покрытие, имеющее более высокую твердость, быстро разрушаются в связи с большой пластической деформацией основания. При этом резко увеличивается величина суммарного износа (пластическая деформация + износ от проскальзывания), что наглядно видно из таблицы 2 и 3.

На рисунке 2 показана кинетика износа стали 20X13 при различных нагрузках на шарик в процессе трения качения с частичным проскальзыванием.

Таблица 2 – Физико-механические и трибологические характеристики образцов после ионного азотирования и термической обработки и их долговечность при испытаниях на трение качения в смазке И-20, нагрузка на шарик 150Н ( $p_0=3180\text{МПа}$ )

№ п/п	Марка стали	Вид термообработки, технология, покрытие	Микротвердость $H_{100}$ , МПа			Толщина покрытия, мкм	Интенсивность изнашивания, $f \cdot 10^{-11}$	Долговечность до появления питтинга, $N \cdot 10^6$ циклов
			Поверхности	Основы	Дорожки качения после испытаний			
1	20X13	без термообработки	2550	2370	3460	–	620	0,58
2	20X13	ионное азотирование в среде 60% Ar + 40% $N_2$	7380	2370	3650	260	570	0,88
3	45	без термообработки	3200	2450	3290	–	600	0,60
4	45	ионное азотирование в среде 60%Ar + 40% $N_2$	7440	2450	4100	280	452	0,96
5	45	закалка	5100	5100	5230	–	21,2	9,1
6	45	закалка + ионное азотирование в среде 60%Ar + 40% $N_2$	7460	4400	7200	290	16,1	12,9
7	45	ионное азотирование в среде 60%Ar + 40% $H_2$	8420	2450	4050	290	440	0,75
8	45	закалка + ионное азотирование в среде 60%Ar + 40% $H_2$	8560	4410	8210	300	15,4	11,2
9	20X13	ионное азотирование в среде 60%Ar + 40% $H_2$	7640	2370	3670	280	580	0,70

Из рисунка видно, что в суммарной величине износа пластическая деформация занимает преобладающую долю, резко возрастает с увеличением нагрузки на шарик. Износ от проскальзывания шариков незначительный в связи с малым коэффициентом проскальзывания (0,4%). При применении в качестве тел качения цилиндрических роликов коэффициент проскальзывания составлял 17,7% и износ от трения скольжения до начала возникновения питтинга был преобладающим по сравнению с пластической деформацией поверхностного слоя. При этом контактная выносливость образцов была на 25-30% меньше. Это объясняется тем, что при точечном контакте материала с шариками имеет место более выгодное объемное напряженно-деформированное состояние по сравнению с линейным контактом цилиндрических роликов.

Исследования многих авторов [1-5] показывают, что максимальные напряжения при контактных нагрузках и изгибе возникают в поверхностных слоях, что приводит к возникновению микротрещин и разрушению, как поверхности, так и конструкции в целом в результате развития и распространения микротрещин с поверхности в сердцевину. Поэтому для повышения износостойкости и долговечности конструктивных элементов и, в частности, зубчатых колес следует укреплять как поверхность, так и сердцевину, но с различными физико-механическими характеристиками – большими поверхности и меньшими в сердцевине. То есть, конструкция поверхностных слоев должна иметь градиентную структуру в соответствии с напряженно-деформированным состоянием, возникающим в детали.

Модельные исследования напряженно-деформированного состояния пластины с многослойными покрытиями при контактной распределенной нагрузке на площадке контакта с нормальными силами, изменяющимися по параболическому закону, показали [11], что повышение прочности и долговечности композиции "покрытие-основа" можно достичь путем:

- нанесения упрочняющих покрытий с высоким модулем упругости и плавным градиентом изменения свойств по глубине от поверхности до основания (диффузных покрытий);

- уменьшением градиента свойств по глубине, за счет увеличения толщины покрытия и повышения жесткости основания;

- нанесения на поверхность покрытия тонких низко модульной пленок, обеспечивающих увеличение площади контакта и антифрикционные свойства.

Эти рекомендации наглядно подтверждаются результатами экспериментальных исследований (таблица 3), в частности: нанесение укрепляющего высоко модульного покрытия нитрида титана и хрома на твердую основу; получение диффузных азотированных слоев с плавным градиентом изменения твердости по толщине; нанесение окислительных пленок на азотированные слои; получение оптимального соотношения твердости покрытия и основы при нитрозакалке существенно повышают износостойкость и контактную выносливость материалов при качении с проскальзыванием.

Таблица 3 – Физико-механические и трибологические характеристики и долговечность образцов после ионного азотирования, термической обработки и других покрытий при испытаниях на трение качения в смазке И-20, нагрузка на шарик 150Н ( $\rho_0=3180\text{МПа}$ )

№ п/п	Марка стали	Вид термообработки, технология, покрытие	Микротвердость $H_{100}$ , МПа			Толщина покрытия, мкм	Интенсивность изнашивания, $I \cdot 10^{-11}$	Долговечность до появления питтинга, $N \cdot 10^6$ циклов
			Поверхности	Ос-новы	Дорожки качения после испытаний			
1	ШХ15	без термообработки	3840	3340	3340	–	594	0,70
2	ШХ15	без термообработки + ионное азотирование	9180	2680	5400	300	312	1,08
3	ШХ15	без термообработки + оксиазотирование	6140	2680	5420	300	210	1,25
4	ШХ15	закалка	7210	7210	7130	–	8,0	25,1
5	ШХ15	закалка + ионное азотирование	9180	4970	7160	300	8,4	24,2
6	ШХ15	закалка + ионное азотирование	7660	5800	7300	290	7,5	26,4
7	ШХ15	закалка + ионное азотирование	7860	5900	6350	120	13,0	22,8
8	ШХ15	закалка + TiN, метод КИБ	14000	5120	5200	5	15,0	22,0
9	ШХ15	без термообработки + TiN, метод КИБ	14000	2680	3350	5	564	0,75
10	ШХ15	закалка + гальваническое нанесение Cr	12000	7210	7140	5	7,6	28,4
11	ШХ15	закалка + гальваническое нанесение Cr	12000	7210	7300	10	7,0	30,1
12	ШХ15	нитрозакалка режим 1	8700	7200	7630	330	3,6	40,8
13	ШХ15	нитрозакалка режим 2	7700	7200	7420	350	3,2	48,8
14	ШХ15	нитрозакалка режим 3	7300	7200	7380	410	3,8	38,4
15	ШХ15	нитрозакалка режим 4	8300	7200	7410	320	3,7	38,7

В зоне контакта при воздействии нагрузки возникают нормальные напряжения с максимумом на поверхности в центре площадки контакта и касательные напряжения с максимумом на определенной глубине. Наличие сил трения вызывает перемещение максимума касательных напряжений с глубины к по-

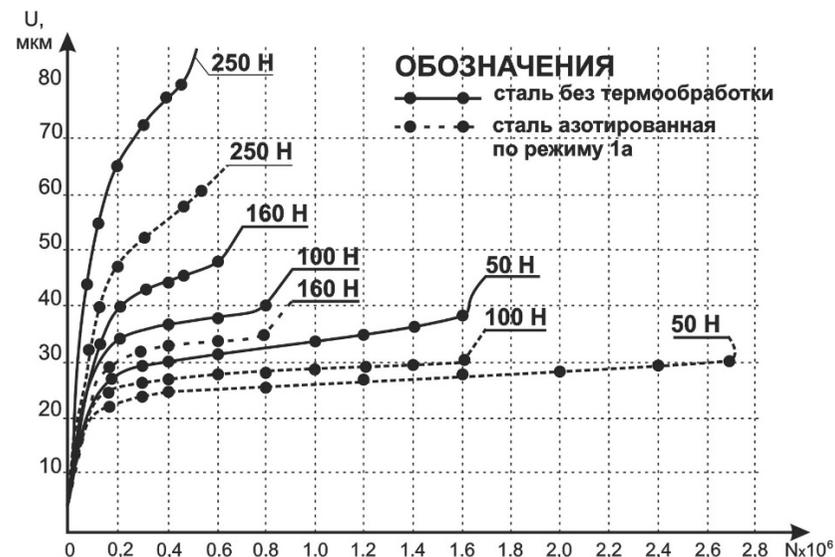


Рисунок 2 – Зависимость износа стали 20X13 при трении качения с проскальзыванием от количества циклов при различных нагрузках на шарик:  $N=50;100;160$  и  $250\text{Н}$

верхности, и при коэффициенте трения 0,4 они выходят на поверхность. Многие исследователи считают, что касательные силы на площадке контакта вызывают растягивающие напряжения, которые способствуют образованию микротрещин. Остаточные напряжения сжатия в поверхностном слое уменьшают напряжение растяжения и способствуют повышению трещиностойкости материала.

**Выводы.** Таким образом, анализ условий эксплуатации и напряженно-деформированного состояния зубьев зубчатых колес показали, что разные участки поверхности зубьев принимают различные по величине и виду напряжения. Наиболее опасными участками поверхности есть ножка, впадина между зубцами и средний участок поверхности зуба, расположенной у полюса зацепления. Поэтому очевидно, что для этих участков поверхности необходимы различные свойства поверхностного слоя. Достичь данной цели можно укреплением поверхности зубьев и в первую очередь на опасных участках за счет нанесения упрочняющих покрытий с градиентной структурой по глубине; созданием в поверхностных слоях остаточных напряжений сжатия с оптимальным значением; укреплением сердцевины зуба. Для этого следует использовать термическую обработку материала зуба с повышением твердости сердцевины, наносить укрепляющие покрытия с применением химико-термической обработки в безводородных средах с управлением физико-механическими характеристиками и фазовым составом покрытий в зависимости от условий эксплуатации и напряженно-деформированного состояния зубчатых колес.

**Список литературы:** 1. Александров В.И., Соболев А.С. Материалы зубчатых колес грузовых автомобилей. – Минск: АНБССР Институт проблем надежности и долговечности машин, 1978. – 58с. 2. Дымышиц И.И. Коробки передач. – М.: Машгиз, 1960. – 360с. 3. Трубин Г.К. Контактная усталость материалов для зубчатых колес. – М.: Машгиз, 1962. – 404с. 4. Конф И.А., Корнилов В.В., Ефимов Е.В. Нестационарная термическая модель заедания и износа эвольвентных зубчатых передач // Техника машиностроения. – 1998. – №1(15). – С.54-59. 5. Зинченко В.М. Инженерия поверхности зубчатых

колес методами химико-термической обработки. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 303с.  
**6.** Механика разрушения и прочность металлов: Справочное пособие: В 4 т. / Под общ. ред. *В.В. Панасюка*. – Киев: Наук. думка, 1988. – Т.1: Основы механики разрушения / *В.В. Панасюк, А.А. Андрейков, В.З. Партон*. – 1988. – 488с. **7.** *Калачев В.А.* Водородная хрупкость металлов. – М.: Metallurgija, 1985. – 217с. **8.** Водород в металлах / Под ред. *Г.Альфельда и И.Фелькля*. – М.: Мир, 1981. – Т.2 – 430с. **9.** *Карпенко Г.В.* Влияние водорода на свойства стали / *Г.В. Карпенко, Р.И. Крипякевич*. – М.: Metallurgizdat, 1962. – 198с. **10.** *Каплун В.Г., Пастух И.М.* Енерго і ресурсозберігаюча екологічна чиста технологія та обладнання для зміннення деталей машин // Машинознавство. – №2. – 2002. – С.49-51. **11.** *Каплун П.В.* Дослідження напружено-деформованого стану пластини з покриттями при контактному навантаженні // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах – 1999. – №4. – С.179-182. **12.** *Каплун П.В.* Кинетика износа сталей с диффузионными покрытиями при контактном циклическом нагружении // Проблемы трибологии. – Хмельницький, 2001. – №1. – С.199-124.

**Bibliography (transliterated):** 1. *Aleksandrov V.I., Sobolev A.S.* Materialy zubchatyh koles gruzovyh avtomobilej. – Minsk: ANBSSR Institut problem nadezhnosti i dolgovechnosti mashin, 1978. – 58p. 2. *Dymshic I.I.* Korobki peredach. – Moscow: Mashgiz, 1960. – 360p. 3. *Trubin G.K.* Kontaktnaja ustalost' materialov dlja zubchatyh koles. – Moscow: Mashgiz, 1962. – 404p. 4. *Kopf I.A., Kornilov V.V., Efimov E.V.* Nestacionarnaja termicheseskaja model' zaedanija i iznosa jevol'ventnyh zubchatyh peredach // Tehnika mashinostroenija. – 1998. – No1(15). – P.54-59. 5. *Zinchenko V.M.* Inzhenerija poverhnosti zubchatyh koles metodami himiko-termicheskoj obrabotki. – Moscow: Izd-vo MGTU im. N. Je. Bauman, 2001. – 303p. 6. Механика разрушения и прочность металлов: Справочное пособие: В 4 vol. / Pod obshh. red. *V. V. Panasyuka*. – Kiev: Nauk. dumka, 1988. – Т.1: Osnovy mehaniki razrusheniya / *V.V. Panasyuk, A.A. Andrejkov, V.Z. Parton*. – 1988. – 488p. 7. *Kalachev V.A.* Vodorodnaja hrupkost' metallov. – Moscow: Metallurgija, 1985. – 217p. 8. Vodorod v metallah / Pod red. *G. Alfel'da i I. Fel'klja*. – Moscow: Mir, 1981. – Vol.2. – 430p. 9. *Karpenko G.V.* Vlijanie vodoroda na svojstva stali / *G.V. Karpenko, R.I. Kripyakevich* – Moscow: Metallurgizdat, 1962. – 198p. 10. *Kaplyn V.G., Pastuh I.M.* Energo i resursozberigajucha ekologichna chista tehnologija ta obladnannja dlja zmnicennja detalej mashin // Mashinoznavstvo. – No2. – 2002. – P.49-51. 11. *Kaplyn P.V.* Doslidzhennja napruzheno-deformovanogo stanu plastini z pokrittjami pri kontaktnomu navantazheni // Vimirjuval'na ta obchisljuval'na tehnika v tehnologichnih procesah – 1999 – No4. – P.179-182. 12. *Kaplyn P.V.* Kinetika iznosa stalej s diffuzionnymi pokryttjami pri kontaktnom ciklicheskom nagruzenii // Zhurnal "Problemi tribologii". – Hmel'nic'kij, 2001. – No1. – P.199-124.

*Поступила (received) 29.04.2015*

УДК 621.833.22

*А.В. КУЗНЕЦОВА*, к.т.н., доцент каф. ПМиКП ДонНТУ, Красноармейск;  
*А.Н. ГНИТЬКО*, к.т.н., доц., заведующий каф. ГМиМСМ ДонНТУ;  
*В.П. ОНИЩЕНКО*, д.т.н., профессор каф. ПМиКП ДонНТУ

### **ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЗАЦЕПЛЕНИЯ КОНИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЧ С ДВОЯКОВЫПУКЛО-ВОГНУТЫМИ ЗУБЬЯМИ НА ИХ РЕСУРС**

В статье проведена оценка влияния параметров зацепления конических передач с двояковыпукловогнутыми зубьями на их ресурс. Разработана методика прогнозирования ресурса конических зубчатых передач с двояковыпукловогнутыми зубьями путем выбора рациональных параметров зацепления на основании моделирования изнашивания зубьев. Методика основывается на двух математических моделях: модели зацепления зубьев и имитационной численной модели изнашивания зубьев.

**Ключевые слова:** двояковыпукловогнутые зубья, износ, ресурс, коническая передача, модуль, число зубьев, контактные напряжения.

**Введение. Актуальность задачи.** В современных серийных конструкциях приводов горных и транспортных машин используются конические передачи с двояковыпукловогнутыми (ДВВ) зубьями, которые имеют ресурс в